

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 29 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420146

研究課題名(和文)非予混合火炎の着火遅れに対する希釈進行効果の解明とモデル化に関する研究

研究課題名(英文) Investigation and modeling of progressive dilution effect on ignition delay of non-premixed flame

研究代表者

名田 譲 (Nada, Yuzuru)

徳島大学・大学院理工学研究部・准教授

研究者番号：50383485

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では非予混合火炎の着火遅れに対する希釈進行効果を明らかにし、その予測モデルを構築するために、対向流層流拡散火炎の数値計算と、高温希釈ガスを巻き込む乱流浮き上がり非予混合火炎の実験を行った。数値計算結果から、既燃ガスの希釈により着火遅れは短くなるが、過度の希釈は着火を遅らせること、希釈率の時間変化は着火遅れに強い影響を及ぼすことがわかった。さらに実験結果から、希釈ガスの巻き込みに起因する濃度低下により浮き上がり高さは高くなること、温度上昇により浮き上がり高さは低くなることを明らかにした。これら巻き込みに起因する現象を再現するモデルを構築し、良好な結果を得た。

研究成果の概要(英文)：In order to clarify and model the progressive dilution effect on ignition delay of non-premixed flame, we conducted numerical simulations for opposed laminar diffusion flames, and measured liftoff heights of turbulent lifted flames entraining diluent gases with high temperatures. The results obtained from the simulations reveal that dilution with high temperature gases shortens the ignition delay time whereas an excessive dilution delays the ignition. In addition, a time variation of dilution ratio of oxidizer significantly influences the ignition delay time. The experimental results demonstrate the increase in liftoff height with decreasing concentrations of reactant resulting from entrainments of diluent gas, and also the decrease in the height with elevating temperature of diluent gas. A model suggested in the present study successfully predicts the liftoff height variation associated with the diluent entrainments.

研究分野：燃焼工学

キーワード：非予混合浮き上がり火炎 既燃ガス希釈 着火遅れ時間 浮き上がり高さ フレームレット着火モデル
予混合モデル

1. 研究開始当初の背景

燃焼装置において、既燃ガス希釈は窒素酸化物などの排出抑制に多く用いられる。例えば、内燃機関における EGR や、燃焼炉やボイラーにおける既燃ガスの内部再循環の利用である。さらに、既燃ガス希釈は火災を安定化させる[1]。

燃焼室(炉)の火炎がノズルから離れ浮き上がった場合を考える(図1参照)。これは、火炎が消える直前に頻りに観察される現象である。この場合、火炎は既燃ガス希釈により、次のように着火で維持される[1]。

- (1)燃料もしくは燃焼用空気の流れが周囲の高温既燃ガスを巻き込みながら発達する。
- (2)空気、燃料および既燃ガスが混合し、高温かつ反応物濃度の低い混合気形成される。
- (3)十分に既燃ガス温度が高い場合、混合気は自着火する。この結果、火炎は維持される。

着火条件(温度と反応物濃度)および着火遅れ時間に対する希釈の影響を明らかにするために、希釈された空気と燃料からなる対向流を用いた研究が行われた[2][3]。これらの研究と図1に示す実際の火炎の違いを以下に説明する。図2に希釈率[4]、温度および濃度の

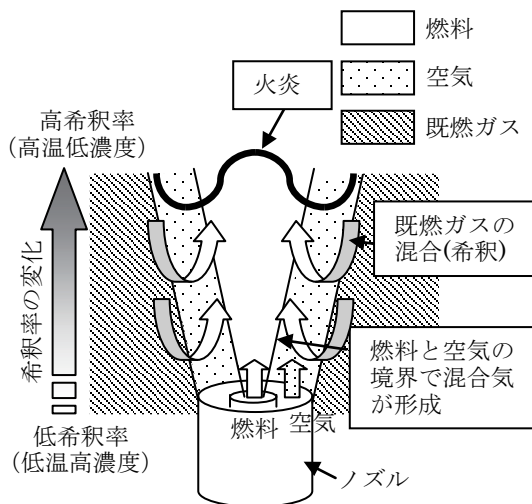


図1 炉内浮き上がり火炎の模式図

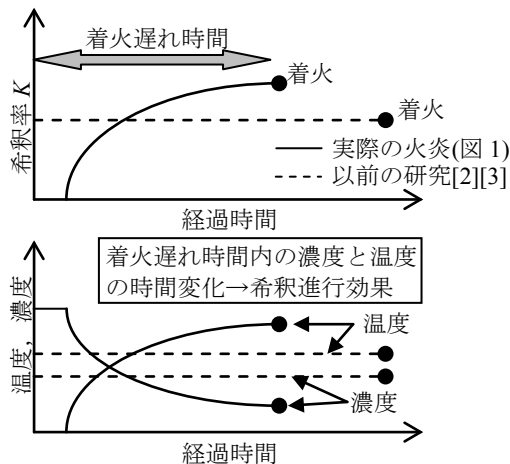


図2 希釈率、温度および濃度の時間変化

の時間変化を示す。ここで、希釈率は巻き込まれた既燃ガスの質量割合である。以前の研究[2][3]は、希釈率が時間経過によらず一定とした場合に対応する。つまり、着火までに温度と濃度は変化しない。しかし、実際の火炎では、下流に行くに従い希釈は進行し、希釈率は高くなる。このため、着火までに温度は上昇し、反応物濃度は低下する。この着火遅れ時間内における反応物濃度と温度の時間変化の影響が希釈進行効果である。希釈進行効果は着火条件または着火遅れ時間に強い影響を与えるにも関わらず、その影響を予測するモデルは提案されていない。このため、建築直後の炉において失火トラブルが多く発生している。

2. 研究の目的

本研究では、着火遅れ時間に対する希釈進行効果の影響を明らかにすることを目的とする。

図3は、研究代表者が求めた反応物噴流における希釈率 K の変化を示している[3]。横軸は反応物噴流を供給するノズル出口からの距離である。ノズル出口から離れるに従い、希釈率は急激に増加する。すなわち、時間の経過とともに希釈は進行し、この結果、反応物濃度は低下し、温度は上昇する。この反応物濃度と温度の時間変化の、着火遅れに対する影響を明らかにする。また、実際の希釈現象は噴流の境界層における乱流運動に起因することから、着火遅れ時間に対する希釈率変動の影響を明らかにする。

非定常フレームレットモデルで用いられるフレームレット方程式は、希釈進行効果を考慮できない。このため、燃焼室内の燃焼現象に対して、フレームレットモデルの適応は難しいとされてきた。本研究では、希釈進行効果を考慮できる非定常修正フレームレット方程式を導出する。以下、この方程式を用いた着火モデルのことを「非定常修正フレームレット着火モデル」と呼ぶ。このモデルの構築と改良を行う。

3. 研究の方法

(1) 数値的研究

本研究では、フレームレットの概念に基づき、着火現象を火炎片における着火で模擬す

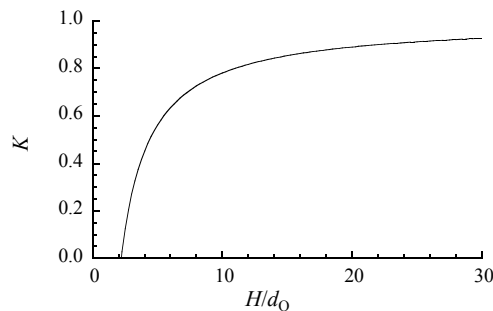


図3 希釈率の変化[3]

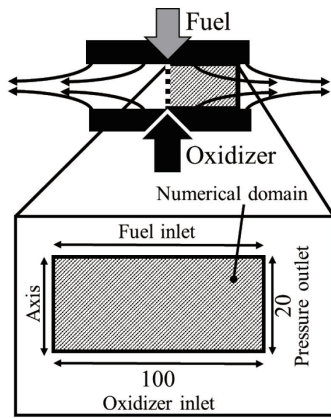


図4 計算領域模式図

る。計算には、汎用流体解析ソフトの ANSYS Fluent を用いた。ANSYS Fluent で非定常二次元計算を行うにあたり必要となる基礎方程式は、低マッハ数近似を施した、運動量保存式、化学種の保存式、エンタルピーの保存式の3式である。当初、対向流の一次元計算を試みたが、いずれも収束性に問題があったため、商用ソフトウェアである Fluent を採用した。

計算領域の模式図を図4に示す。計算は対向流バーナーを模擬した軸対象二次元平面において行われた。図中、上側から燃料が流入し、下側から酸化剤が流入する。左側の境界が対象軸となり、右側の境界は流出境界となる。流出境界では、勾配ゼロのノイマン境界条件を課した。ノズル半径は100 mmであり、ノズルの間隔は20 mmである。燃料は温度300 Kのメタンである。反応機構にはGRI3.0を用いた。計算負荷低減のために、skeletal 反応機構を検討したが、予測精度の点からGRI3.0を用いた。

(2) 実験的研究

本研究では、燃料、酸化剤、既燃ガスを模擬した低酸素濃度ガスからなる三流体の浮き上がり火炎を対象として実験を行い、浮き上がり高さに対する既燃ガス希釈の影響を調べた。

図5に実験装置の模式図を示す。実験装置は同軸三重管ノズルと、それを囲うフードからなる。同軸ノズル中央から順に、燃料、酸

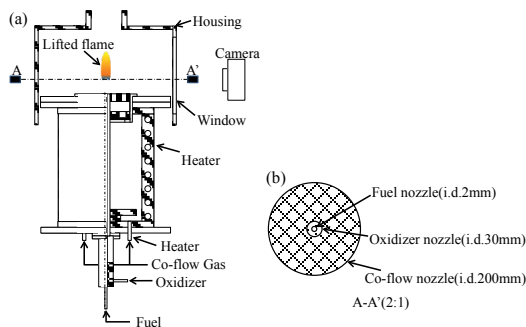


図5 実験装置模式図

化剤、周囲ガスが供給される。この周囲ガスは循環する既燃ガスを模擬している。酸化剤と周囲ガスは空気と窒素または二酸化炭素の混合気である。燃料ノズル、酸化剤ノズルおよび周囲ガスノズルの内径は、それぞれ2 mm, 30 mm および 200 mm とした。

燃料には、プロパンと窒素の混合気を用いた。プロパンの濃度 X_F は70 vol.%である。酸化剤酸素濃度 $X_{O_2,0}$ および周囲ガス酸素濃度 $X_{O_2,c}$ は、21 vol.%から18 vol.%とした。周囲ガスは電気ヒーターにより加熱される。ただし、周囲ガス流速の均一性を保つために、周囲ガスの温度を560 Kに制限した。1000 K程度の高温既燃ガスの内部循環が発生する小型燃焼炉を検討したが、浮き上がり高さの測定精度が低いため、使用を断念した。現在周囲ガスの予熱には電気ヒーターを用いているが、予備バーナーによる高温既燃ガスの生成装置が必要と考えられる。

燃料流速 U_F は7 m/s からブローアウトが発生する流速の範囲で変化させた。室温条件での酸化剤と周囲ガスの流速は0.2 m/s であり、昇温条件(560 K)では0.2 m/s と0.3 m/s とする。浮き上がり高さの測定は、デジタルカメラ(Nikon D90)による火炎の直接撮影により行われた。200枚の写真の浮き上がり高さを平均し、平均浮き上がり高さ H を求めた。

4. 研究成果

(1) 数値的研究

図6に着火遅れに対する酸化剤の酸素濃度の影響を示す。本計算では、着火時刻を酸化剤の温度より1%上昇した時刻とし、反応開始(計算開始)から着火までの時間を着火遅れ時間とする。燃料はメタンで、酸化剤の温度は1400 Kとした。また、酸化剤を窒素で希釈することで、酸素濃度を低下させた。酸化剤の酸素濃度が低下すると着火遅れが増加することがわかる。

図7に着火遅れに対する酸化剤温度の影響を示す。計算条件として酸化剤温度を $T_{oxi} =$

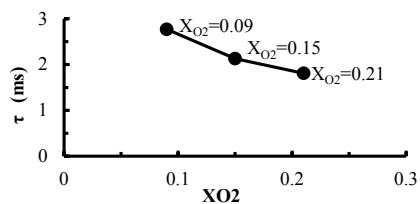


図6 着火遅れに対する酸化剤酸素濃度の影響

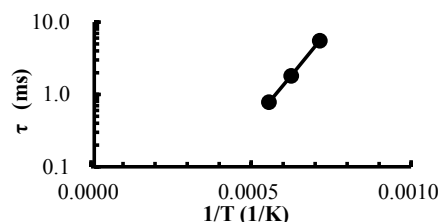


図7 着火遅れに対する酸化剤温度の影響

1400 K, $T_{\text{oxi}} = 1600 \text{ K}$, $T_{\text{oxi}} = 1800 \text{ K}$ の 3 条件とした。酸化剤酸素濃度は 21% である。化学反応時において反応物温度の低下に伴い反応が抑制されるため、酸化剤温度の逆数の増加により着火遅れは長くなることわかる。

図 8 に着火遅れに対する既燃ガス希釈の影響を示す。計算条件は希釈度を $K = 0, 0.25, 0.5, 0.75, 0.95$ の 5 条件とした。希釈度は以下の式

$$K = M_d / (M_f + M_d)$$

M_d = 既燃ガス質量
 M_f = 反応物質量

であらわれ、既燃ガスは 1800 K の量論燃焼時の既燃ガス (CO_2 , H_2O および N_2) で模擬した。希釈度が高くなるにつれ反応物濃度は低下し、酸化剤流と燃料流の間に形成される混合気の温度は高くなる。図 8 より $K = 0$ から $K = 0.5$ の場合、希釈率が增加すると着火遅れ時間は減少する。反応物 (燃料と酸化剤 O_2) 濃度の低下に対して、反応物温度の上昇の影響が大きいいため、希釈率が增加すると着火遅れが短くなると考えられる。一方で、 $K = 0.5$ から $K = 0.75$ の場合、反応物濃度低下の影響が強くなり、希釈率が增加すると着火遅れ時間は長くなる。希釈度 $K = 0.95$ においても計算を行ったが、反応物濃度が低すぎるため着火しなかった。

噴流火炎における既燃ガスの巻き込みを模擬するために、酸化剤濃度を 21% から 9% まで時間に対して線形に変化させた (図 9)。この場合の着火遅れを図 10 に示す。酸化剤

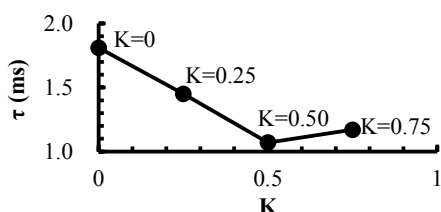


図 8 着火遅れに対する希釈率の影響

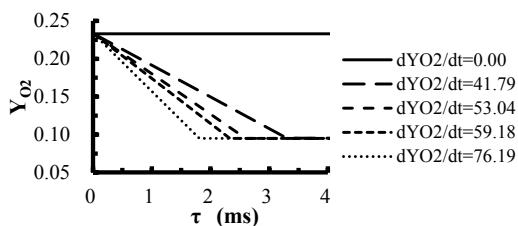


図 9 酸化剤酸素濃度の時間変化

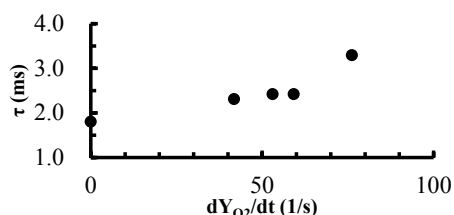


図 10 酸化剤酸素濃度の減少速度の影響

の温度は 1600 K 一定とし、二酸化炭素で希釈することで酸素濃度を低下させた。横軸は酸素濃度の低下速度であり、既燃ガスの巻き込み流量に相当する。巻き込み流量が増加するに従い、着火遅れは増加する傾向にある。これは、酸素濃度の時間変化が着火遅れに強い影響を及ぼすことを示している。

酸化剤酸素濃度が変化する場合、燃焼場を混合分率で記述することは困難となる。これは、フレームレット方程式に濃度の時間変化項が現れるためである。図 10 に示す結果をフレームレット方程式で表現する手法の開発が今後必要となる。

(2) 実験的研究

本研究では、室素および二酸化炭素と空気を加熱することで既燃ガスを模擬する。図 11 に燃料流速 U_F に対する浮き上がり高さ H の変化の一例を示す。図中の横軸は燃料流速 U_F 、縦軸は浮き上がり高さ H を表している。また、図中のエラーバーは浮き上がり高さの時間変化に関する標準偏差を示す。周囲ガスの温度は 300 K と 560 K であり、周囲ガスは二酸化炭素により希釈されている。

図 11 に示す浮き上がり火炎の燃料流速に対する挙動は次のとおりである。周囲ガス温度 300 K、酸素濃度 21% の場合、 $U_F = 5 \text{ m/s}$ で付着火炎であった拡散火炎は、 $U_F = 6 \text{ m/s}$ にて層流浮き上がり火炎となる。 $6 \text{ m/s} \leq U_F \leq 13 \text{ m/s}$ の範囲は、流れ場が層流から乱流へと遷移する領域であり、浮き上がり高さは緩やかに上昇する。 $U_F \geq 14 \text{ m/s}$ の流れ場が完全に乱流に遷移した領域では、浮き上がり高さは燃料流速の増加に対して線形に高くなる。

周囲ガス酸素濃度が低下するにしたがい、浮き上がり高さは高くなる。さらに、周囲ガス温度の上昇により浮き上がり高さは急激に低下することがわかる。これらの現象は、既燃ガスを模擬した周囲ガスを巻き込むことにより生じる。

図 12 は、従来の浮き上がり高さ予測モデ

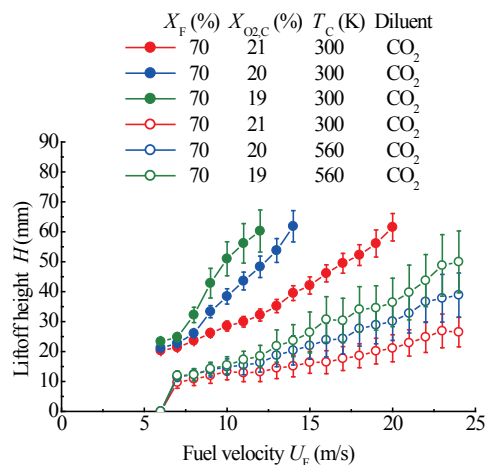


図 11 浮き上がり高さ

ルである予混合火炎モデルを用いて、図 11 に示す浮き上がり高さ HS_L/v_F と燃料流速 $(\rho_F/\rho_O)^{1.5}U_F/S_L$ の関係を整理した結果である。従来の予混合火炎モデルでは、既燃ガス巻き込みによる希釈が無い場合、無次元浮き上がり高さ HS_L/v_F と無次元流速 $(\rho_F/\rho_O)^{1.5}U_F/S_L$ の間には線形関係が成立する。ここで、 S_L は層流燃焼速度、 v_F は燃料の動粘性係数、 ρ_F と ρ_O はそれぞれ燃料と酸化剤の密度である。一方、本研究で対象とした巻き込みによる希釈効果が強い火炎では、図 12 に示すように、実験結果を一つの直線で表すことはできず、その傾きも実験条件ごとに大きく異なる。

本研究では、希釈による温度上昇と反応物濃度低下の影響を考慮した修正予混合火炎モデルを構築した。図 13 は図 11 に示す浮き上がり高さ $HS_{L,K}/v_F$ と燃料流速 $(\rho_F/\rho_{O,K})^{1.5}U_F/S_{L,K}$ により整理した結果である。修正予混合モデルは、既燃ガスおよび既燃ガスを模擬したガスの巻き込みによる希釈効果を考慮したモ

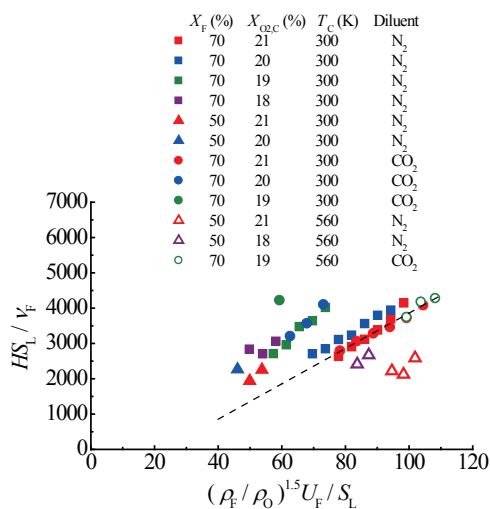


図 12 予混合火炎モデルに基づく浮き上がり高さ HS_L/v_F と燃料流速 $(\rho_F/\rho_O)^{1.5}U_F/S_L$ の関係

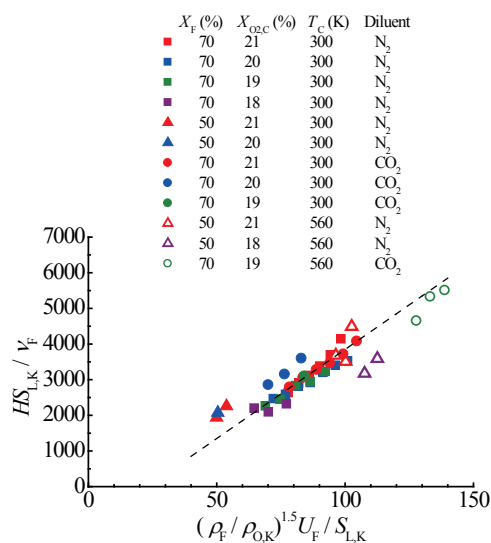


図 13 修正予混合火炎モデルに基づく結果

デルである。このモデルを用いることにより、無次元浮き上がり高さ $HS_{L,K}/v_F$ と無次元流速 $(\rho_F/\rho_{O,K})^{1.5}U_F/S_{L,K}$ の間には線形関係が得られる。ここで、 $S_{L,K}$ は希釈された予混合気の層流燃焼速度を、 $\rho_{O,K}$ は希釈された酸化剤の密度を示している。

以上、浮き上がり高さに対する既燃ガス希釈の影響を考慮した浮き上がり高さの予測式を構築できた。今後予熱温度を高くすることで、着火に基づく浮き上がり火炎を再現し、数値計算による着火遅れとの関係を明らかにすることが必要となる。

参考文献：[1] 名田ら，燃焼学会誌，53 巻，(2011)，pp. 262-270. [2]Langille, et al., Combust. Sci. Tech., Vol. 178 (2006), pp. 635-653. [3] 名田ら，日本機械学会論文集 B 編，78 巻，(2012)，pp. 1127-1142. [4] 名田ら，日本機械学会論文集 B 編，75 巻 (2009)，pp. 1870-1878.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

- ①石原達朗，川崎史也，名田譲，木戸口善行，乱流拡散火炎の浮き上がり高さに対する巻き込みによる温度上昇と希釈効果の影響の解明，日本機械学会 中四国学生会第 47 回学生員卒業研究発表講演会，2017 年 3 月 6 日，広島工業大学(広島県・広島市)。
- ②川崎史也，野村匠太，石原達朗，名田譲，木戸口善行，乱流非予混合火炎の浮き上がり高さに対する既燃ガス温度の影響の解明，第 54 回燃焼シンポジウム，2016 年 11 月 23 日，仙台国際センター(宮城県・仙台市)。
- ③高橋伸佳，今岡雅彦，松本正幸，杉山和也，名田譲，木戸口善行，気体燃料を用いた高温空気燃焼の NOx 排出特性に対するバーナー構造の影響，日本機械学会 中四国学生会第 46 回学生員卒業研究発表講演会，2016 年 3 月 8 日，愛媛大学(愛媛県・松山市)。

〔その他〕

研究代表者ホームページ

<http://www.me.tokushima-u.ac.jp/pel/japanese/jp-index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

名田 譲 (Nada Yuzuru)

徳島大学・大学院理工学研究部・准教授

研究者番号：50383485